

การลดค่าความนำชลศาสตร์ของดินทรายที่มีขนาดคละไม่ดีด้วยเบนโทไนท์

Hydraulic conductivity reduction of poorly graded sand by bentonite

สหัสชัย ปรีวัตพันธ์^{1*} สมชาย ดอนเจดีย์^{2*} และ นิมิตร เจริญพันธ์^{2*}

¹นิสิตปริญญาโท ห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีการชลประทาน, ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะ

วิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ นครปฐม 73140

²ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีการชลประทาน, ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะ

วิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ นครปฐม 73140

Sahatchai Parivatphun¹ Somchai Donjadee^{2*} and Nimit Cherdchanpipat^{2*}

¹Graduate Student, Irrigation Technology Research Laboratory, Department of Irrigation, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen, Kasetsart University, Nakhon Pathom 73140, Thailand

²Assistant Professor, Irrigation Technology Research Laboratory, Department of Irrigation, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen, Kasetsart University, Nakhon Pathom 73140, Thailand

*Corresponding author: Email: pung4207@gmail.com

(Received: September 28, 2018; Accepted: April 21, 2020)

บทคัดย่อ

การศึกษาค่าความนำชลศาสตร์ของดินทรายโดยการผสมด้วยเบนโทไนท์ ได้ดำเนินการโดยใช้ดินทรายที่พบในกลุ่มน้ำลำภาชีซึ่งมีปัญหาการรั่วซึมสูง โดยนำดินทรายตัวอย่างมาทดสอบในห้องปฏิบัติการ จากการทดสอบพบว่าดินทรายตัวอย่างมีค่าความนำชลศาสตร์เท่ากับ 119.2 mm/day ที่ความหนาแน่น 1.69 g/cm³ และมีค่าความนำชลศาสตร์เท่ากับ 23.16 mm/day ที่ความหนาแน่น 2.25 g/cm³ จากการศึกษาพบว่าค่าความนำชลศาสตร์มีค่าลดลงเมื่อ อัตราส่วนผสมเบนโทไนท์ หรือ ความหนาแน่นของดิน หรือ ระยะเวลาในการบ่มตัวอย่างเพิ่มขึ้น โดยเมื่อนำเบนโทไนท์มาผสมดินทรายตัวอย่างและทำการบ่มไว้ 1 วัน พบว่าค่าความนำชลศาสตร์มีค่า 0.81, 0.42, 0.18 mm/day ที่ความหนาแน่น 2.01-2.08 g/cm³ ด้วยอัตราส่วนผสมเบนโทไนท์ร้อยละ 5, 7 และ 9 โดยน้ำหนักตามลำดับ การศึกษาวิจัยครั้งนี้ยังพบว่าดินทรายผสมเบนโทไนท์ที่ทำการทดสอบทุกกรณีมีค่าความนำชลศาสตร์อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้สำหรับการนำไปใช้คาดสระเก็บน้ำ ยกเว้นดินที่มีอัตราส่วนผสมเบนโทไนท์ร้อยละ 5 และ 7 โดยน้ำหนักซึ่งไม่ได้ทำการบ่มและไม่ได้ทำการบดอัดก่อนการนำไปใช้งาน งานวิจัยนี้ยังได้นำเสนอสมการสำหรับใช้เป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจใช้เบนโทไนท์เป็นส่วนผสมในดินทรายสำหรับกรณีอื่น

คำสำคัญ: ความนำชลศาสตร์, เบนโทไนท์, ดินทรายที่มีขนาดคละไม่ดี, การรั่วซึม

ABSTRACT

The main focus of this research is a study of the hydraulic conductivity of poorly graded sand by mixing with bentonite. The poorly graded sand found in the Pachi Basin are characterized by a high degree of leakage. The laboratory tests of the poorly graded sand samples resulted in

a hydraulic conductivity of 119.2 mm/day and 23.16 mm/day at the bulk density of 1.69 g/cm³ and 2.25 g/cm³, respectively. The results also show that as bentonite ratios, bulk density, and curing period increase, the hydraulic conductivity is decreased. When bentonite was mixed with poorly graded sand and cured for 1 day, the hydraulic conductivity was 0.81, 0.42, 0.18 mm/day at bulk density 2.01-2.08 g/cm³ with bentonite content of 5%, 7%, and 9%, respectively. The study also found that all tested samples of bentonite poorly graded sand have acceptable hydraulic conductivity to be used in ponds. Except for soil with 5% and 7% bentonite content by weight, this is not cured and not compacted before use. This research also presents the equation for design of the bentonite ratio as an ingredient in sandy soils for another case.

Keyword: Hydraulic conductivity, Bentonite, Poorly graded sand, Seepage.

1. บทนำ

ประเทศไทยถือว่าเป็นหนึ่งในประเทศเกษตรกรรมที่มีพื้นที่ถือครองทางการเกษตรคิดเป็นร้อยละ 46.53 ของพื้นที่ทั้งหมด แต่กลับมีพื้นที่การเกษตรที่อยู่ในเขตชลประทานเพียง 23.8 ล้านไร่ [1] คิดเป็นร้อยละ 21.7 ของพื้นที่การเกษตร ดังนั้นการทำเกษตรกรรมในพื้นที่นอกเขตชลประทานจึงต้องอาศัยน้ำฝนเป็นหลัก จากการศึกษาวิเคราะห์แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำฝนในประเทศไทยพบว่า ค่าเฉลี่ยรายปีของปริมาณฝนมีแนวโน้มลดลงประมาณ 129 มิลลิเมตร [2] จากข้อมูลดังกล่าวกระทรวงเกษตรและสหกรณ์จึงได้มอบหมายให้กรมพัฒนาที่ดินดำเนินการจัดหาแหล่งน้ำ เพื่อสนับสนุนการทำเกษตรนอกเขตชลประทาน [3] ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561 โดยส่งเสริมให้มีการขุดสระน้ำขนาด 1,260 m³ เพื่อบรรเทาสภาพปัญหาภัยแล้ง การขาดแคลนน้ำ และเพิ่มประสิทธิภาพการเก็บกักน้ำในพื้นที่ของการเกษตร ซึ่งเกษตรกรเป็นผู้รับผิดชอบค่าใช้จ่ายเพียง 2,500 บาท จำนวน 47,500 สระ ซึ่งโครงการข้างต้นได้รับความสนใจจากเกษตรกรเป็นอย่างมาก สระเก็บน้ำในโครงการดังกล่าวมีกระจายอยู่ทั่วประเทศ ซึ่งบางพื้นที่ไม่เหมาะสมที่จะทำการขุดสระเก็บน้ำเนื่องจากสภาพดินไม่เหมาะสม จากรายงานของสำนักเศรษฐกิจการเกษตร พบว่ามีสระเก็บน้ำนอกเขตชลประทานร้อยละ

18 ไม่สามารถขังน้ำไว้ใช้ได้ตามที่ออกแบบไว้เนื่องจากมีการรั่วซึมสูงมากสาเหตุจากสภาพดินที่ไม่เหมาะสม ดังเช่นในพื้นที่ลุ่มน้ำลำภาชี แนวทางการแก้ปัญหาที่มีประสิทธิภาพทางหนึ่งคือการปรับปรุงดินบริเวณพื้นผิวสระให้มีค่าความชื้นได้ลดลงจนอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

การลดอัตราการรั่วซึมของดินสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้วัสดุป้องกัน การปูด้วยแผ่นพลาสติก การดาดด้วยคอนกรีต การดาดด้วยดินซีเมนต์ [4] การดาดด้วยดินโคลน [5] การดาดด้วยผ้าใบคอนกรีต [6] การใช้น้ำยางธรรมชาติ [7] และการปรับปรุงดินให้มีคุณสมบัติในการเพิ่มประสิทธิภาพการลดอัตราการรั่วซึมของน้ำ ได้แก่ การบดอัดดิน [5,8] การผสมวัสดุบางชนิดเข้าไปในดิน เช่น ปุ๋ยคอก [9] แคลเซียมคาร์บอเนต [10] ผงซีเมนต์ [4,11] เบนโทไนท์ [12,13] เป็นต้น อย่างไรก็ตามวัสดุแต่ละชนิดก็จะมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันออกไป เบนโทไนท์นับว่าเป็นวัสดุชนิดหนึ่งที่มีความนิยม เนื่องจากเบนโทไนท์เป็นดินที่เกิดจากแก้วภูเขาไฟที่ผ่านกระบวนการเปลี่ยนแปลงตามธรรมชาติเป็นระยะเวลาอันยาวนาน จนเกิดเป็นดินที่มีคุณสมบัติพองตัวสูง ซึ่งมีองค์ประกอบของมอนต์มอริลโลไนต์ เป็นแร่ดินเหนียวหลัก รองลงมาได้แก่ ซิลิกอนไดออกไซด์ เหล็กออกไซด์และแคลเซียมออกไซด์ [14,15] ทำให้มีค่าความนำชลศาสตร์ (Hydraulic conductivity) น้อยมาก โดย Ahn และ Jo [16] ได้

ทดสอบหาค่าความนำชลศาสตร์ของโซเดียมเบนโทไนท์ และแคลเซียมเบนโทไนท์จากจังหวัด Gyeongsang ประเทศเกาหลีใต้ พบว่ามีค่า 3.3×10^{-11} และ 6.2×10^{-11} m/s ตามลำดับ ในขณะที่ Komine [17] (อ้างอิงจาก Ahn and Jo [16]) พบว่าค่าความนำชลศาสตร์ของ แคลเซียมเบนโทไนท์จากแหล่งอื่นมีค่า 6.0×10^{-11} m/s Xu et al. [18] พบว่าเบนโทไนท์จากจังหวัด Hebei ประเทศจีนมีค่าความนำชลศาสตร์ 6.3×10^{-12} m/s ดังนั้น การลดค่าความนำชลศาสตร์ของดินโดยการผสมเบนโทไนท์ในปริมาณที่เหมาะสมเป็นวิธีช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการลดการรั่วซึมได้เป็นอย่างดี เช่น Gleason et al. [12] ได้ศึกษาการใช้ทรายผสมเบนโทไนท์เพื่อลดค่าความนำชลศาสตร์ของดินทรายโดยใช้เบนโทไนท์ 5% โดยน้ำหนัก ผสมกับทรายแล้วทำการบดอัดด้วยวิธี Standard Procter (ASTM D698) ทำให้ความนำชลศาสตร์มีค่าน้อยกว่า 1×10^{-9} m/s ในขณะที่ โกวิทย์ [19] ได้ทำการทดลองโดยใช้เบนโทไนท์ที่อัตราส่วน 5, 10, 15% โดยน้ำหนัก ผสมกับทรายภายใต้แรงกดทับ 150 kPa พบว่ามีค่าความนำชลศาสตร์ เท่ากับ 3×10^{-8} , 2×10^{-10} , 5×10^{-12} m/s ตามลำดับ Malusis et al. [13] ได้ทำการหาความนำชลศาสตร์ของทรายผสมโซเดียมเบนโทไนท์ โดยมีส่วนผสมของเบนโทไนท์ 5.8% โดยน้ำหนัก จากการศึกษาพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การนำชลศาสตร์มีค่าโดยเฉลี่ย 1×10^{-6} ถึง 2.8×10^{-10} m/s ซึ่งค่าดังกล่าวขึ้นอยู่กับความพรุน, น้ำหนักจำเพาะและการทรุดตัวของดิน Guler et al. [20] ได้นำเบนโทไนท์ผสมดินประเภทก้อนกลมที่มีขนาดเฉลี่ย 1 mm โดยใช้ส่วนผสมของเบนโทไนท์ 8, 10, 12 และ 15% โดยน้ำหนัก ซึ่งทำให้ค่าความนำชลศาสตร์มีค่า 1×10^{-7} , 8×10^{-8} , 4×10^{-8} และ 7×10^{-9} m/s ตามลำดับ ดัง จะเห็นได้ว่าเบนโทไนท์มีประสิทธิภาพในการลดค่าความนำชลศาสตร์ของดินที่นำมาผสม อย่างไรก็ตาม ผลการศึกษาที่มีความแตกต่างกันเนื่องจากมีปัจจัยหลายอย่าง ส่งผลต่อค่าความนำชลศาสตร์ ได้แก่ ชนิดดินและคุณสมบัติของดิน อุณหภูมิ [21] ชนิดคุณสมบัติของเบนโท

ไนท์ [18] ปริมาณส่วนผสมของเบนโทไนท์ในดิน [16] ความเป็นกรดต่าง [22] การบดอัด [23] เป็นต้น

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาความสามารถในการลดอัตราส่วนการรั่วซึมของเบนโทไนท์ที่นำมาผสมกับดินทราย โดยพิจารณาค่าความนำชลศาสตร์กับอัตราส่วนผสมของเบนโทไนท์ การทดลองในครั้งนี้จะใช้โซเดียมเบนโทไนท์ซึ่งมีขายตามท้องตลาดทั่วไปผสมกับดินทรายที่พบในพื้นที่ลุ่มน้ำลุ่มน้ำภาคีซึ่งมีปัญหาการรั่วซึมสูง นำมาทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยใช้วิธีความดันคงที่ และยังได้นำเสนอสมการที่เหมาะสมกับดินทรายผสมเบนโทไนท์ที่อัตราส่วนผสมของเบนโทไนท์ต่าง ๆ โดยใช้ข้อมูลของนักวิจัยท่านอื่นมาพิจารณาด้วย เพื่อนำค่าที่ได้ไปเป็นเกณฑ์ตัดสินใจในการเลือกใช้อัตราส่วนผสมเบนโทไนท์สำหรับใช้เป็นชั้นวัสดุกันซึม ซึ่งจะเป็นประโยชน์สำหรับการใช้งานกับสระเก็บน้ำในไร่นาต่อไป

2. วิธีดำเนินการวิจัย

ดินที่นำมาใช้ทดสอบในการทดลองครั้งนี้จะใช้ดินทราย เมื่อทำการจำแนกดินตามระบบ unified พบว่าดินทรายที่นำมาทดลองนั้นเป็นดินเนื้อหยาบที่อยู่ในกลุ่มของดิน SP (Poorly graded sand) ซึ่งดินที่นำมาทดลองนั้นมีลักษณะใกล้เคียงกับดินทรายที่พบในพื้นที่ลุ่มน้ำภาคี ซึ่งเป็นดินที่มีค่าความนำชลศาสตร์สูง เมื่อขุดสระเก็บน้ำในพื้นที่ดังกล่าวก็มักมีการรั่วซึมจนบางครั้งไม่สามารถเก็บกักน้ำไว้ได้ จากการเก็บตัวอย่างดินทรายในพื้นที่ลุ่มน้ำภาคี ซึ่งการเก็บตัวอย่างจะทำการเก็บแบบตัวอย่างเปลี่ยนแปลง (disturbed sample) แล้วจึงนำมาจำแนกประเภทของดิน (Soil classification) โดยวิธีการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน (Sieve analysis) และวิธีไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer analysis) พบว่าดินทรายตัวอย่างเป็นดินทรายที่มีขนาดคละกันไม่ดี (Poorly graded soil) มีขนาดเม็ดสม่ำเสมอ (Uniform graded) โดยมีค่า Coefficient of Uniformity (Cu) เท่ากับ 2.75 มีค่า Coefficient of Curvature (Cc) เท่ากับ 0.59 เมื่อทำการการจำแนกดินด้วยระบบ Unified Soil

ปีที่ 15 ฉบับที่ 1 เดือน มกราคม – เมษายน พ.ศ. 2563

Classification System (USCS) พบว่าเป็นดินเม็ดหยาบในกลุ่ม SP (Poorly graded sand) สำหรับเบนโทไนท์ที่ใช้เป็นโซเดียมเบนโทไนท์ธรรมชาติชนิดผงซึ่งมีขายทั่วไปตามท้องตลาด ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมมีค่าความชื้นร้อยละ 10 และมีคุณสมบัติพื้นฐานอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของโซเดียมเบนโทไนท์

Measurement	Sodium Bentonite
Methylene blue (g/100g)	32
Colloid value (mL/15g)	100
Swollen value (mL/g)	20
pH	8.0-9.5
Residue (<0.075 mm)	5%

ที่มา : บริษัทเทพเกษตรอุตสาหกรรม จำกัด. [24]

2.1 การเตรียมตัวอย่าง

ในการศึกษานี้ได้จำลองสถานการณ์ของการนำดินทรายผสมเบนโทไนท์ไปใช้ในสภาวะต่าง ๆ โดยแบ่งกรณีศึกษาและออกแบบการทดลองดังนี้

1) กรณีที่ 1 (T1): กรณีที่ใช้ดินทรายอย่างเดียวไม่ทำการบดอัด ซึ่งเป็นการจำลองสถานการณ์ที่เกษตรกรขุดสระเก็บน้ำโดยไม่ทำการบดอัด โดยมีวิธีการเตรียมตัวอย่างดังนี้ นำดินทรายตัวอย่างบรรจุเข้าไปใน Mold สแตนเลส

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15.24 cm. (6 in.) สูง 17.78 cm. (7 in.) ทำการหาความหนาแน่นของตัวอย่างและนำตัวอย่างไปทดสอบหาค่าความนำชลศาสตร์ทันทีด้วยวิธีความดันคงที่ (Constant Head) โดยใช้ความดันที่ 250 kPa

2) กรณีที่ 2 (T2): กรณีที่ใช้ดินทรายและทำการบดอัด ซึ่งเป็นการจำลองสถานการณ์ที่เกษตรกรขุดสระเก็บน้ำและทำการบดอัด โดยมีวิธีการเตรียมตัวอย่างดังนี้ นำดินทรายตัวอย่างบรรจุเข้าไปใน Mold ทำการบดอัดด้วย

วิธีการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Proctor) ตามมาตรฐาน ASTM D 698 Standard Proctor Test ซึ่งเป็นการบดอัดดินในกระบอกบดอัดมาตรฐานมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 15.24 cm. (6 in.) โดยทำการแบ่งการบดอัดดินออกเป็น 3 ชั้น ในแต่ละชั้นจะทำการบดอัดจำนวน 56 ครั้ง ด้วยค้อนมาตรฐานที่มีตุ้มน้ำหนักขนาด 2.5 kg. (5.5 lb.) และมีระยะตกกระทบ 30 cm. (12 in.) จากนั้นทำการหาความหนาแน่นของตัวอย่าง และนำตัวอย่างไปทดสอบหาค่าความนำชลศาสตร์ทันที ด้วยวิธีความดันคงที่ โดยใช้ความดันที่ 250 kPa

3) กรณีที่ 3 (T3): กรณีที่ใช้ดินทรายผสมเบนโทไนท์ในอัตราส่วนต่าง ๆ โดยไม่ทำการบ่ม และไม่ทำการบดอัด ซึ่งเป็นการจำลองสถานการณ์ที่เกษตรกรขุดสระเก็บน้ำโดยใช้ทรายผสมเบนโทไนท์ โดยทำการคาดพื้นผิวสระเก็บน้ำทันทีที่ผสมเสร็จและไม่ทำการบดอัด โดยมีวิธีการเตรียมตัวอย่างดังนี้ นำทรายตัวอย่างผสมเบนโทไนท์ด้วยอัตราส่วนของเบนโทไนท์ร้อยละ 5, 7 และ 9 โดยน้ำหนักตามลำดับ บรรจุเข้าไปใน Mold ทำการหาความหนาแน่นของตัวอย่างและนำตัวอย่างไปทดสอบหาค่าความนำชลศาสตร์ทันทีด้วยวิธีความดันคงที่ โดยใช้ความดันที่ 500 kPa

4) กรณีที่ 4 (T4): กรณีที่ใช้ดินทรายผสมเบนโทไนท์ในอัตราส่วนต่าง ๆ แล้วทำการบ่มแต่ไม่ทำการบดอัด ซึ่งเป็นการจำลองสถานการณ์ที่เกษตรกรขุดสระเก็บน้ำโดยใช้ทรายผสมเบนโทไนท์โดยทำการบ่มเป็นเวลา 1 วัน จากนั้นค่อยนำไปคาดพื้นผิวสระเก็บน้ำโดยไม่ทำการบดอัด โดยมีวิธีการเตรียมตัวอย่างดังนี้ นำทรายตัวอย่างผสมเบนโทไนท์ด้วยอัตราส่วนของเบนโทไนท์ร้อยละ 5, 7 และ 9 ตามลำดับ บรรจุเข้าไปใน Mold ทำการหาความหนาแน่นของตัวอย่างและทำการบ่มตัวอย่างด้วยการจัดเก็บตัวอย่างในถุงพลาสติกที่ปิดมิดชิดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้เบนโทไนท์ดูดซับความชื้นและเป็นการปรับสภาพให้ตัวอย่างมีความชื้นที่สม่ำเสมอ จากนั้นนำตัวอย่างไปบรรจุลง Mold โดยไม่ทำการบดอัด หาค่าความหนาแน่น

ของตัวอย่างและทำการทดสอบหาค่าความนำชลศาสตร์ ด้วยวิธีความดันคงที่โดยใช้ความดันที่ 500 kPa

5) กรณีที่ 5 (T5): กรณีที่ใช้ดินทรายผสมเบนโทไนท์ ในอัตราส่วนต่าง ๆ โดยทำการบ่มและทำการบดอัด ซึ่งเป็นการจำลองสถานการณ์ที่เกษตรกรขุดสระเก็บน้ำโดยใช้ทรายผสมเบนโทไนท์ ทำการบ่มเป็นเวลา 1 วัน หลังจากผสมเสร็จ จากนั้นนำไปตาดพื้นผิวสระเก็บน้ำ โดยวิธีการบดอัด มีวิธีการเตรียมตัวอย่างดังนี้ นำทรายตัวอย่างผสมเบนโทไนท์ด้วยอัตราส่วนของเบนโทไนท์ร้อยละ 5, 7 และ 9 ตามลำดับ ทำการบ่มตัวอย่างด้วยการจัดเก็บตัวอย่างในถุงพลาสติกที่ปิดมิดชิดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการบรรจุลง Mold หาค่าความหนาแน่นของตัวอย่างและบดอัดด้วยวิธีการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Proctor) ตามมาตรฐาน ASTM D 698 Standard Proctor Test หาค่าความหนาแน่นของตัวอย่าง และนำตัวอย่างไปทดสอบหาค่าความนำชลศาสตร์ โดยวัดค่าความนำชลศาสตร์ที่ 1 วันและ 7 วัน ด้วยวิธีความดันคงที่โดยใช้ความดันที่ 500 kPa

สยามและคณะ[34] ได้ทำการศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินลูกรังที่มีขนาดละเอียดต่างกัน พบว่าค่าความหนาแน่นของดินเป็นหนึ่งในปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความนำชลศาสตร์ของดิน ดังนั้นการทดลองในครั้งนี้จึงควบคุมค่าความหนาแน่นของตัวอย่างการทดลองที่มีสภาวะการทดลองเหมือนกันให้มีค่าความแตกต่างกันไม่เกินร้อยละ 5 โดยตัวอย่างให้ที่ไม่มี การบดอัดดินจะมีค่าความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 1.68 – 1.72 g/cm³ ส่วนตัวอย่างที่มีการบดอัดดินจะมีค่าความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 2.21 – 2.27 g/cm³

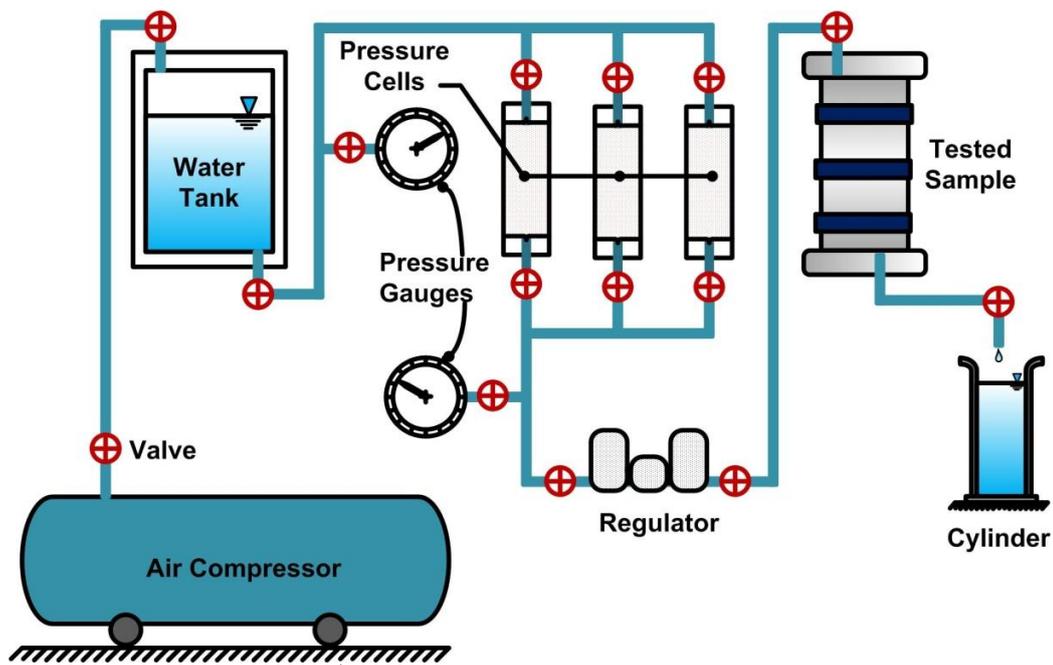
2.2 การทดสอบหาค่าความนำชลศาสตร์

การทดสอบด้วยการวัดค่าความนำชลศาสตร์ จะทำการทดลองตามมาตรฐาน ASTM D 2434 สำหรับการทดลองในครั้งนี้จะทำการทดลองแบบความดันคงที่ อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบค่าความนำชลศาสตร์ (ภาพที่ 1) ประกอบไปด้วย ปัมลม (Air compressor) จะทำหน้าที่ในการเพิ่มแรงดัน, วาล์วควบคุมแรงดัน, ถังควบคุมแรงดันน้ำ (Water tank) จะทำหน้าที่ในการควบคุมแรงดันน้ำในการทดสอบ, เกจวัดความดัน (Pressure gauge), เครื่อง de-aired water จะทำหน้าที่ในการแยกฟองอากาศออกจากน้ำ, แบบหล่อสำหรับทดสอบการซึมผ่านของน้ำในดินแบบบดอัด (Compacted Permeability Mold)

การหาค่าความนำชลศาสตร์สามารถหาได้จากสมการที่ 1 [25] โดยมีนักวิจัยหลายท่านได้ใช้วิธีนี้ในการหาค่าความนำชลศาสตร์ [26] สมการดังกล่าวนี้มีที่มาจากกฎของดาร์ซี (Darcy 's Law) ซึ่งดาร์ซีได้ศึกษาพบว่าความสัมพันธ์ของความเร็วในการไหล (V) กับความแตกต่างของระดับน้ำ 2 จุด (Pressure) นั้นแปรผันเป็นสัดส่วนโดยตรง แต่ค่าความนำชลศาสตร์ (K) นั้นจะเป็นค่าคงที่ ดังนั้นการทดลองในครั้งนี้จึงใช้ค่าความนำชลศาสตร์ในการเปรียบเทียบความสามารถในการลดอัตราการซึมของน้ำ แทนค่าความเร็วในการไหล (V)

$$K = \frac{Q \times L}{A \times h \times t} \quad (1)$$

เมื่อ K คือค่าความนำชลศาสตร์ (cm/s) Q คือปริมาณน้ำไหลผ่านตัวอย่างในช่วงเวลาการวัด (cm³) L คือ ความสูงของตัวอย่าง (cm) A คือพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง (cm²) h คือ ผลต่างของระดับน้ำ (cm) และ t คือ ช่วงเวลาในการวัด (s)



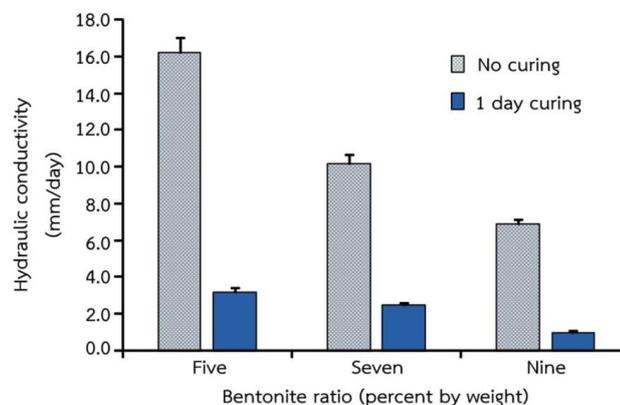
รูปที่ 1 อุปกรณ์สำหรับทดสอบค่าความนำชลศาสตร์

3. ผลการทดลอง

การศึกษาหาความสามารถในการลดการรั่วซึมของเบนโทไนท์สำหรับใช้นำมาผสมกับทรายได้ดำเนินการในห้องปฏิบัติการ พบว่าดินทรายที่นำมาทดลองในครั้งนี้มีขนาดละเอียด และจัดอยู่ในทรายประเภท SP (จำแนกโดยระบบ Unified) มีความถ่วงจำเพาะ 2.71 ในการทดลองนี้ได้ทำการทดสอบหาค่าความนำชลศาสตร์ของดินทรายที่พบในพื้นที่ลุ่มน้ำลำภาชี พบว่าดินทรายตัวอย่างกรณีไม่ทำการบดอัดมีค่าความนำชลศาสตร์ เท่ากับ 119.2 mm/day (1.38×10^{-6} m/s) ที่ความหนาแน่น

1.69 g/cm^3 และเมื่อทำการบดอัดพบค่าความนำชลศาสตร์มีค่าเท่ากับ 23.16 mm/day (2.68×10^{-7} m/s) ที่ความหนาแน่น 2.25 g/cm^3 โดยทำการบดอัดที่ความชื้น 10 เปอร์เซ็นต์

การทดสอบหาปริมาณอัตราส่วนผสมของเบนโทไนท์เพื่อใช้ลดค่าความนำชลศาสตร์ของดินทราย โดยใช้เบนโทไนท์มาผสมในอัตราส่วนร้อยละ 5, 7 และ 9 โดยน้ำหนัก สำหรับการศึกษากรณี T3 และ T4 โดยผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 2

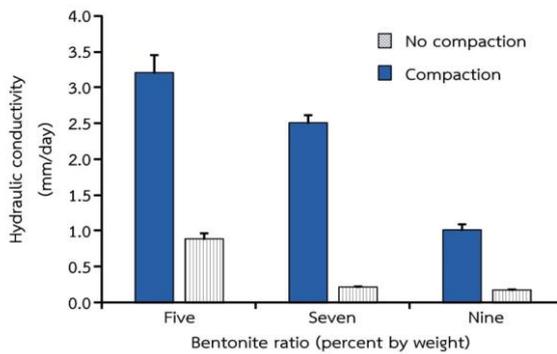


รูปที่ 2 การเปรียบเทียบค่าความนำชลศาสตร์ระหว่างกรณีที่ไม่มีการบ่มและกรณีที่มีการบ่มทรายผสมเบนโทไนท์

หมายเหตุ : แกนด้านบนของกราฟ คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

จากรูปที่ 2 เมื่อนำเบนโทไนท์มาผสมดินทรายโดยไม่ทำการบดอัด กรณีที่ไม่ทำการบดตัวอย่างพบว่าค่าความนำคลศาสตร์เท่ากับ 16.2, 10.2 และ 6.9 mm/day ในขณะที่เมื่อบดตัวอย่างทิ้งไว้ 1 วันจะทำให้ค่าความนำคลศาสตร์ลดลงเหลือ 3.2, 2.5 และ 1.0 mm/day สำหรับอัตราส่วนเบนโทไนท์ร้อยละ 5, 7 และ 9 โดยน้ำหนักตามลำดับ ซึ่งผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเบนโทไนท์มีประสิทธิภาพสูงมากในการช่วยลดค่าความนำคลศาสตร์ โดยเมื่อเปรียบเทียบกับดินทรายที่ไม่ผสมเบนโท

ไนท์พบว่าสามารถทำให้ค่าความนำคลศาสตร์ลดลงได้ 7.4, 11.7 และ 17.3 เท่า กรณีที่ไม่ทำการบดตัวอย่างและลดลงได้ 37.1, 47.5 และ 116.9 เท่า กรณีที่ทำการบดตัวอย่าง สำหรับเบนโทไนท์ที่ใช้ผสมทรายร้อยละ 5, 7 และ 9 โดยน้ำหนักตามลำดับ งานวิจัยนี้ยังได้ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าความนำคลศาสตร์ของดินทรายที่ผสมและไม่ผสมเบนโทไนท์กรณีที่ไม่ทำการบด แสดงดัง รูปที่ 3

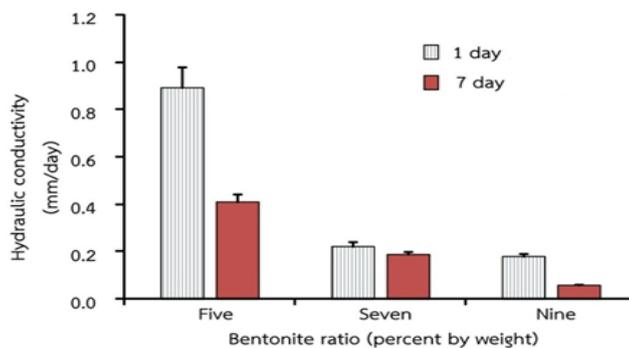


รูปที่ 3 การเปรียบเทียบค่าความนำคลศาสตร์เมื่อทำการบดอัดตัวอย่าง

หมายเหตุ : แกนด้านบนของกราฟ คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

จาก รูปที่ 3 เป็นการเปรียบเทียบค่าความนำคลศาสตร์ของดินทรายผสมเบนโทไนท์กรณีที่ไม่ทำการบดอัด เปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ทำการบดอัด ซึ่งดินตัวอย่างจะถูกบดก่อนนำมาทำการทดลอง 1 วัน พบว่ากรณีที่ไม่ทำการบดอัดจะทำให้ค่าความนำคลศาสตร์มีค่า 0.89, 0.22 และ 0.18 mm/day และสามารถลดค่าความนำคลศาสตร์ลงได้ 4.81, 5.98 และ 5.67 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่

ทำการบดอัด สำหรับอัตราส่วนเบนโทไนท์ร้อยละ 5, 7 และ 9 โดยน้ำหนักตามลำดับ อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ได้ทำการวัดค่าความนำคลศาสตร์ของดินทรายผสมเบนโทไนท์ที่ไม่ทำการบดอัดเมื่อเวลาผ่านไป โดยทำการเปรียบเทียบระหว่าง 1 วันกับ 7 วันผลการศึกษาดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 การเปรียบเทียบค่าความนำคลศาสตร์ในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน

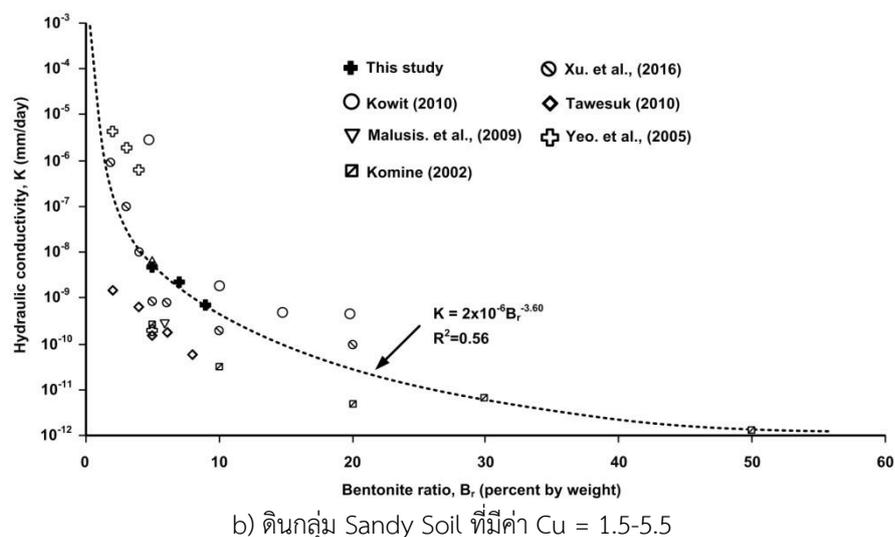
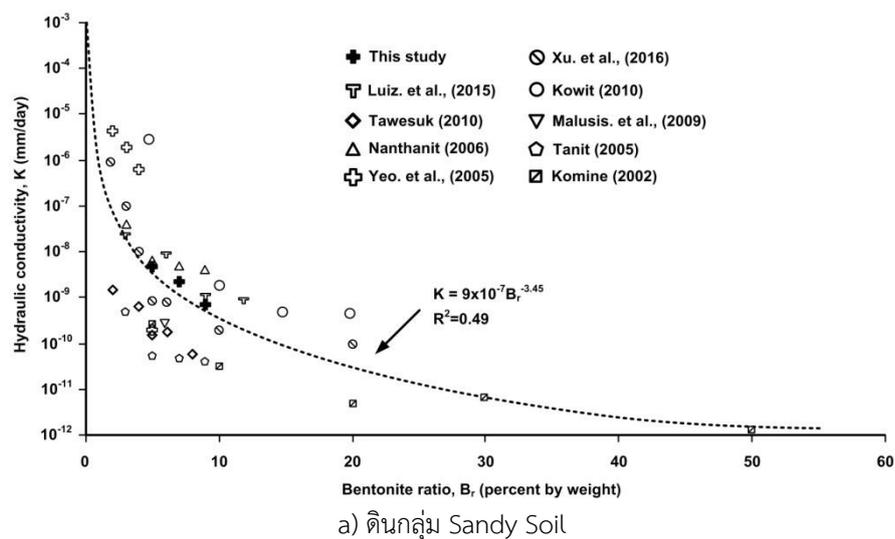
หมายเหตุ : แกนด้านบนของกราฟ คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

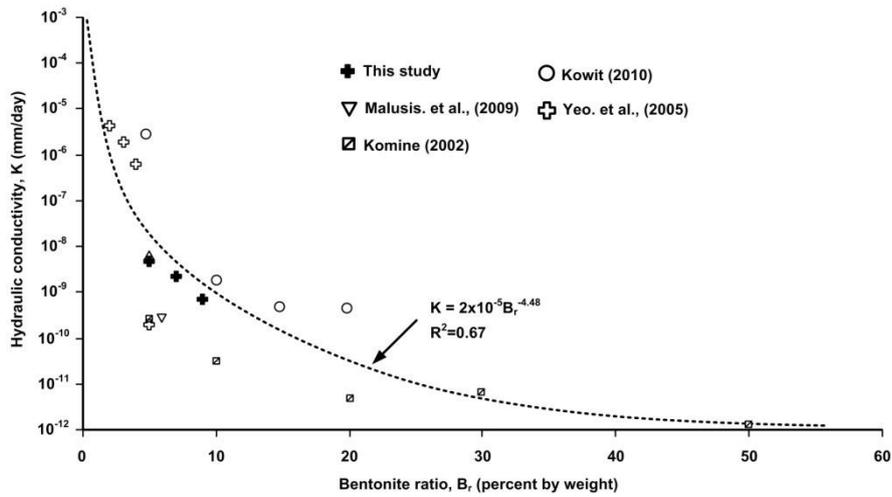
จาก รูปที่ 4 เป็นการเปรียบเทียบค่าความนำชลศาสตร์ของดินทรายผสมเบนโทไนท์เมื่อเวลาผ่านไป โดยทำการวัดที่ 1 วัน กับ 7 วัน จากการทดลองพบว่าค่าความนำชลศาสตร์ลดลงจาก 0.81 mm/day เมื่อวัดที่ 1 วัน เหลือ 0.4 mm/day เมื่อทำการวัดที่ 7 วัน สำหรับอัตราส่วนเบนโทไนท์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักและลดลงประมาณ 2.2 และ 3.0 เท่า สำหรับอัตราส่วนเบนโทไนท์ร้อยละ 7 และ 9 โดยน้ำหนักตามลำดับ

3.1 ความสัมพันธ์ของค่าความนำชลศาสตร์กับอัตราส่วนผสมของเบนโทไนท์

จากการศึกษาครั้งนี้พบว่าเบนโทไนท์มีประสิทธิภาพสูงในการลดค่าความนำชลศาสตร์ซึ่งจะส่งผลให้ การรั่วซึม

ของดินทรายลดลงไปด้วย อย่างไรก็ตามผลการวิจัยครั้งนี้ อาจไม่เหมาะสมกับดินทรายในพื้นที่อื่นที่มีลักษณะแตกต่างกันออกไป ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้ทำการรวบรวมข้อมูลจากนักวิจัยหลายท่าน [13, 17-19, 26-30] ที่ทำการศึกษาค่าความนำชลศาสตร์ของดินทรายผสมเบนโทไนท์ และนำมาสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำชลศาสตร์และอัตราส่วนผสมของทรายผสมเบนโทไนท์ ผลที่ได้แสดงดัง รูปที่ 5





c) ดินกลุ่ม Sandy Soil ที่มีค่า Cu = 1.5-3.0

รูปที่ 5 ค่าความนำชลศาสตร์ของทรายผสมเบนโทไนต์ในอัตราส่วนต่าง

จาก รูปที่ 5 พบว่าเมื่อจำนวนอัตราส่วนเบนโทไนท์ที่นำมาผสมทรายเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความนำชลศาสตร์ลดลง โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการ $K = 9 \times 10^{-7} B_r^{-3.45}$ (รูปที่ 5a) เมื่อ K คือค่าความนำชลศาสตร์ (m/s) และ B_r คืออัตราส่วนผสมเบนโทไนท์โดยน้ำหนัก (เปอร์เซ็นต์) อย่างไรก็ตามสมการดังกล่าวนี้ให้ค่าสัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจ (Coefficient of determination, $R^2=0.49$) ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ต่ำ [31, 32] ทำให้ไม่ควรที่จะนำมาใช้ในการตัดสินใจออกแบบส่วนผสมของเบนโทไนท์ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการตรวจสอบข้อมูลของดินทรายของนักวิจัยดังกล่าวพบว่าหากพิจารณา นำค่า Coefficient of uniform (Cu) มาเป็นเกณฑ์ในการสร้างสมการ จะทำให้สามารถตัดข้อมูลของ นันทนต์ย [28] และ Luiz.et al. [26] เนื่องจากไม่ทราบค่า Cu และ ข้อมูลของ Tanit [29] เนื่องจากมีค่า Cu เท่ากับ 15 ซึ่งมากกว่าของนักวิจัยท่านอื่นมาก จากนั้นสามารถสร้างสมการความสัมพันธ์ใหม่ดังสมการ $K = 2 \times 10^{-6} B_r^{-3.69}$ (รูปที่ 5b) ค่า $R^2=0.56$ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ตัดสินใจปานกลาง [31, 32] สมการดังกล่าวสามารถใช้ได้กับดินทรายที่มีค่า Cu ตั้งแต่ 1.5 ถึง 5.5 อย่างไรก็ตามหากตัดข้อมูลของ Xu.et al [18] และ ทวีศักดิ์ [27] ซึ่งมีค่า Cu มากกว่า 3 ออก จะทำให้สมการมีค่า R^2 เพิ่มขึ้นเป็น 0.67 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ตัดสินใจปาน

กลาง [31, 32] และได้ความสัมพันธ์ดังสมการ $K = 2 \times 10^{-5} B_r^{-4.48}$ (รูปที่ 5c) โดยสามารถใช้ได้กับดินทรายที่มีค่า Cu ตั้งแต่ 1.5 ถึง 3.00

4. สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

การลดค่าความนำชลศาสตร์ของดินทรายโดยการผสมเบนโทไนท์นั้นว่าเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพ โดยการศึกษาครั้งนี้พบว่า ค่าความนำชลศาสตร์มีค่าลดลงเมื่อปริมาณเบนโทไนท์เพิ่มขึ้น โดยหากนำดินทรายมาผสมเบนโทไนท์กรณีที่ไม่ทำการบดอัดพบว่า เมื่อทำการบ่มตัวอย่างค่าความนำชลศาสตร์มีค่า 3.2, 2.5 และ 1.0 mm/day และ 16.2, 10.2 และ 6.9 mm/day เมื่อไม่บ่มตัวอย่าง สำหรับกรณีบดอัดตัวอย่างพบว่าค่าความนำชลศาสตร์ลดลงเหลือ 0.89, 0.22 และ 0.18 mm/day สำหรับอัตราส่วนเบนโทไนท์ร้อยละ 5, 7 และ 9 โดยน้ำหนักตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความนำชลศาสตร์มีค่าลดลงเมื่อเวลาผ่านไปโดยมีค่า 0.81, 0.42 และ 0.18 mm/day เมื่อเวลาผ่านไป 1 วัน และ 0.41, 0.19 และ 0.06 mm/day เมื่อเวลาผ่านไป 7 วัน สำหรับอัตราส่วนผสมเบนโทไนท์ร้อยละ 5, 7 และ 9 โดยน้ำหนักตามลำดับ งานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบความสามารถของเบนโทไนท์ในการลดค่าความนำชลศาสตร์พบว่า

สามารถลดค่าความนำชลศาสตร์ลงได้ 29, 55 และ 129 เท่า กรณีทำการบดอัดตัวอย่างและ 31, 48 และ 117 เท่า กรณีที่ไม่ทำการบดอัดตัวอย่าง สำหรับอัตราส่วนเบนโทไนท์ร้อยละ 5, 7 และ 9 ตามลำดับ

สุวณี และคณะ [33] ได้เสนอแนะว่าดินที่มีความเหมาะสมที่จะทำการขุดสระไว้สำหรับกักเก็บน้ำ ควรจะมีค่าความนำชลศาสตร์ไม่มากกว่า 8.6 mm/day ซึ่งเมื่อนำผลที่ได้จากการศึกษาวิจัยครั้งนี้พบว่า ทราบผลสมเบนโทไนท์ที่ทำการทดสอบทุกกรณีมีค่าความนำชลศาสตร์อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ยกเว้นทราบผลสมเบนโทไนท์ที่มีอัตราส่วนผสมเบนโทไนท์ร้อยละ 5 และ 7 ที่ไม่ได้ทำการบ่มและไม่ทำการบดอัดก่อนการนำไปใช้งาน อย่างไรก็ตาม เพื่อให้สามารถใช้เป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจใช้เบนโทไนท์เป็นส่วนผสมในดินทรายสำหรับกรณีอื่น ๆ เช่น การใช้รองพื้นบ่อขยะ ซึ่งจะต้องมีค่าความตึบน้ำสูงกว่าสระน้ำ งานวิจัยนี้จึงได้สร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนผสมของเบนโทไนท์ที่นำมาผสมดินทราย โดยได้สมการดังนี้ $K = 9 \times 10^{-7} B_r^{-3.45}$ ($R^2=0.49$) ใช้ได้กับดินทรายทั่วไป และ $K = 2 \times 10^{-6} B_r^{-3.69}$ ($R^2=0.56$) ใช้ได้กับดินทรายทั่วไปที่มีค่า C_u 1.5 - 5.5 และ $K = 2 \times 10^{-5} B_r^{-4.48}$ ($R^2=0.67$) ใช้ได้กับดินทรายทั่วไปที่มีค่า C_u 1.5 - 3.0 เมื่อ K คือค่าความนำชลศาสตร์ (m/s) และ B_r คืออัตราส่วนผสมเบนโทไนท์ (เปอร์เซ็นต์)

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ให้ทุนสนับสนุนสำหรับการศึกษาวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

[1] สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, *สถิติการเกษตรของประเทศไทย ปี 2559*, กรุงเทพฯ: กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2559.

- [2] จิรสรณ์ สันติสิริสมบูรณ์, *การลดขนาดแบบจำลองภูมิอากาศโลกเพื่อการศึกษาผลกระทบการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศต่อการผลิตข้าวของประเทศไทย* งานวิจัยด้านการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ, กรุงเทพฯ: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, 2559.
- [3] กรมพัฒนาที่ดิน. (สืบค้นเมื่อ 28 พฤษภาคม 2561). โครงการแหล่งน้ำในไร่นานอกเขตชลประทาน [online]. Available: http://www.ddd.go.th/WEB_Water/index.html
- [4] Jin L., Song W., Shu X., and Huang B., "Use of water reducer to enhance the mechanical and durability properties of cement-treated soil," *Construction and Building Materials*. vol.159, pp. 690-694, Jan. 2018.
- [5] Bouwer, H., Ludke, J., Rice R.C., "Sealing pond bottoms with muddy water," *Ecological Engineering*, vol.18, pp. 233-238, Dec. 2001.
- [6] สมชาย ดอนเจดีย์, วราวุธ วุฒิมิขย์ และนิริชต์ สงวนเดือน, "การประยุกต์ใช้ผ้าใบคอนกรีตสำหรับการชลประทาน," ใน *ชลกร ฉบับวันชูชาติ 4 มกราคม 2560*, กรุงเทพฯ : สมาคมศิษย์เก่าวิศวกรรมชลประทาน ในพระบรมราชูปถัมภ์, 2560, หน้า 157-166.
- [7] เจริญ นาคะสรรค์, อาชีชัน แกสมาน และอดิศัย รุ่งวิชานวิวัฒน์, "ต้นแบบการทำยางปูระน้ำจากน้ำยางธรรมชาติ," สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, กรุงเทพฯ, รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์, 15 กุมภาพันธ์ 2550.
- [8] J. Kolawole, M. Osinubi, M. O. Charles and A. M. Nwaiwu, "Hydraulic conductivity of compacted Lateritic soil," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol.131, no.8, pp. 1034-1041, Aug. 2005.

- [9] A. Shahid, M. Aslam and M. Shafiq, "Reducing water seepage from earthen ponds," *Agricultural Water Management*, vol.30, pp. 69-76, Mar. 1996.
- [10] ศราวุธ โกวเครือ และประทีป ดวงเดือน, (2552). "การปรับปรุงคุณภาพของดินลูกรังโดยใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเหลือใช้จากโรงงาน," ใน *เอกสารประกอบการประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 14*. นครราชสีมา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, หน้า 281-286.
- [11] ชัชชัย พิรมงคล, "การประยุกต์ใช้ดินซีเมนต์เพื่อการดาดคูส่งน้ำชลประทาน," *ปฏิญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน, บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์*, 2545.
- [12] M. H. Gleason, D. E. Daniel and G. R. Eykholt, "Calcium and sodium bentonite for hydraulic containment applications," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol.123, no.5, pp. 438-445, May 1997.
- [13] M. A. Malusis, E. J. Barben and J. C. Evans, "Hydraulic conductivity and compressibility of soil-bentonite backfill amended with activated carbon," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol.135, no.5, pp. 664-672, May 2009.
- [14] A. Norris, G. D. Emidio, M. A. Malusis and M. Replogle, "Modified bentonites for soil-bentonite cutoff wall applications with hard mix water," *Applied Clay Science*, vol.158, pp. 226-235, June 2018.
- [15] J. Lin, B. Jiang and Y. Zhan, "Effect of pre-treatment of bentonite with sodium and calcium ions on phosphate adsorption onto zirconium-modified bentonite," *Journal of Environmental Management*, vol.217, pp. 183-195, Jul. 2018.
- [16] H. S. Ahn and H. Y. Jo, "Influence of exchangeable cations on hydraulic conductivity of compacted bentonite," *Applied Clay Science*, vol.44, pp. 144-150, Apr. 2009.
- [17] H. Komine, "Theoretical equations on hydraulic conductivities of bentonite-based buffer and backfill for underground disposal of radioactive wastes," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol.134, no.4, pp. 497-508, Apr. 2008.
- [18] H. Xu, W. Zhu, X. Qian, S. Wang and X. Fan, "Studies on hydraulic conductivity and compressibility of backfills for soil-bentonite cutoff walls," *Applied Clay Science*, vol.132-133, pp. 326-335, Nov. 2016.
- [19] โกวิทย์ ทศศิริ, "คุณสมบัติการไหลซึมของของไหลที่มีสารปนเปื้อนผ่านวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนท์บดอัด," *ปฏิญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตภาควิชาวิศวกรรมโยธา, บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย*, 2544
- [20] E. Guler, H. O. Ozhan and S. Karaoglu, "Hydraulic performance of anionic polymer-treated bentonite-granular soil mixtures," *Applied Clay Science*, vol.157, pp. 139-147, Jun. 2018.
- [21] W. J. Cho, J. O. Lee and K. S. Chun, "The temperature effects on hydraulic conductivity of compacted bentonite," *Applied Clay Science*, vol.14, pp. 47-58, Feb. 1999.

- [22] W. M. Ye, Z. J. Zheng, B. Chen, Y. G. Chen, Y. J. Cui and J. Wang, "Effects of pH and temperature on the swelling pressure and hydraulic conductivity of compacted GMZ01 bentonite," *Applied Clay Science*, vol.101, pp. 192-198, Nov. 2014.
- [23] C. S. Hong, C. D. Shackelford and M. A. Malusis, "Consolidation and hydraulic conductivity of zeolite-amended soil-bentonite backfill," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 138, no.1, pp. 15-25, Jan. 2012.
- [24] บริษัทเทพเกษตรอุตสาหกรรม จำกัด, "รายงานผลการทดสอบโซเดียมเบนโทไนด์" สำนักวิเคราะห์วิจัยทรัพยากรธรณี กรมทรัพยากรธรณี, กรุงเทพฯ, สิงหาคม 2560.
- [25] T. W. Lambe, *Soil Testing for Engineers*, New York: John Wiley & Sons Publishing, 1951.
- [26] T. L. C. Morandini and A. D. L. Leite, "Characterization and hydraulic conductivity of tropical soils and bentonite mixtures for CCL purposes," *Engineering Geology*, vol.196, pp. 251-267, Sep. 2015.
- [27] ทวีศักดิ์ วั่งไพศาล และ นท แสงเทียน, "คุณสมบัติของดินทรายปนทรายแป้งผสมเบนโทไนด์สำหรับก่อสร้างชั้นกันซึม," *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี*, ปีที่12 ฉบับที่1, หน้า 19-29, มกราคม-เมษายน 2553.
- [28] นันทินิตย์ เจริญไธสง, "ศักยภาพของการใช้ทรายผสมเบนโทไนด์และดินเหนียวสงขลาเพื่อใช้เป็นชั้นกันซึมในสถานที่ฝังกลบมูลฝอย" ปริญญาานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิตภาควิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม, บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2549.
- [29] T. Chalermyanont and S. Arrykul, "Compacted sand-bentonite mixtures for hydraulic containment liners," *Songklanakarin journal of science and technology*, vol.27, no.2, pp. 313-323, 2005.
- [30] S. S. Yeo, C. D. Shackelford and J. C. Evans, "Consolidation and hydraulic conductivity of nine model soil-bentonite backfills," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol.131, no.10, pp. 1189-1198, Oct. 2005.
- [31] J. S. Cramer, *Mean and Variance of R² in Small and Moderate Samples*, *Journal of Econometrics*, vol.35, pp. 253-266, Jul. 1987.
- [32] Darlington, R., *Regression and Linear Models*, New York: McGraw-Hill, 1990.
- [33] สุวณี ศรีธวัช ณ อยุธยา, สมปอง นิลพันธ์, สมพงษ์ อ้นท้วม และ นฤมล จันทวีชรากร, "การประเมินค่าการสูญเสียน้ำโดยการรั่วซึมของสระน้ำที่ขุดในชุดดินต่างๆ บนพื้นที่ดินดอน," กรมพัฒนาที่ดิน, กรุงเทพฯ, รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์, กันยายน 2542.
- [34] สยาม แกมขุนทด, พานิช วุฒิพฤกษ์, สันชัย อินทพิชัย และพิทยา แจ่มสว่าง, "ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินลูกรังที่มีขนาดละเอียดแตกต่างกัน," *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 25 ฉบับที่ 1, หน้า 11-19, มกราคม - เมษายน 2558.